

# 增量成形研究进展

张璐<sup>1</sup> 李言<sup>1</sup> 杨明顺<sup>1</sup> 袁启龙<sup>1</sup> 崔凤奎<sup>2</sup>

(1 西安理工大学机械与精密仪器工程学院,西安 710048)

(2 河南科技大学机械工程学院,洛阳 471003)

**文 摘** 重点综述了新型增量成形技术中的 4 类典型成形工艺,即局部不均匀加载下板面内弯曲增量成形、单点增量成形、多点柔模成形、高速冷滚打成形就其成形原理、工艺、设备及研究现状等方面的研究成果,并提出了这类新型增量成形的研究方向。

**关键词** 塑性加工,增量成形,无模(或柔模)无约束,局部加载

## Recent Development of Incremental Forming

Zhang Lu<sup>1</sup> Li Yan<sup>1</sup> Yang Mingshun<sup>1</sup> Yuan Qilong<sup>1</sup> Cui Fengkui<sup>2</sup>

(1 Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

(2 School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003)

**Abstract** Incremental forming technology is a very important part of precise shaping technology. Incremental forming technology as a new type of precision plastic forming includes many characteristics such as small tonnage, local loading, dieless (or flexible die) and unconstrained, which can formed more complex shape part without special die and also has some favorable features such as small forming load and high flexibility. This technology is particularly suitable for multi-variety and small-batch production of parts, so that more attentions are paid to it by the international community. This article focuses on the forming principle, forming technology, forming equipment, research status and other research results of this new incremental forming technology in four typical forming process, which are in-plane bending under unequal local loading incremental forming, single point incremental forming, multi-point flexible die forming and high-speed cold roll-beating forming, so as to point out a helpful direction for further research.

**Key words** Technology for plasticity, Incremental forming, Dieless(or flexible die) and unconstrained, Local loading

### 0 引言

目前,绿色、节能、精密、高效加工技术已成为制造加工领域重点研究和发展的方向之一。轻量强韧、精密高效、绿色近净成形技术是当代航空航天、汽车和高新技术产业对零件加工提出的迫切需要。先进塑性成形技术已成为零件制造技术的前沿研究领域,探索轻量化、快速、精密塑性加工新方法是该领域重要的研究课题<sup>[1-2]</sup>。精密塑性成形技术主要包括金属精密模锻、精密冲裁、挤压等加工工艺。通过精密塑性成形的机械构件外形精确、尺寸精度和形位精度高、表

面质量好。但一般都需要专用模具,需整体加载,能源消耗大。近年来,增量成形技术得到国内外学者普遍关注<sup>[1]</sup>。加拿大 Jeswiet 等<sup>[3-4]</sup>提出了一种无模无约束的单点增量成形技术,以其设备简单、柔性大的特点得到了关注;西北工业大学杨合等<sup>[2]</sup>,提出了一种控制局部不均匀加载增量成形技术,重点针对薄壁轻量化构件进行数控精确塑性成形;哈尔滨工业大学王仲仁等<sup>[5-6]</sup>,主要研究薄壁件数控单点增量成形工艺;吉林大学李明哲提出了板料多点柔模成形技术,可以实现薄板三维曲面成形,使成形过程柔性大大提高<sup>[7]</sup>;西安理工大学李言

收稿日期:2011-07-21;修回日期:2011-10-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975229,51075124)、陕西省科技计划资助项目(2009JQ7003)

作者简介:张璐,1982 年出生,博士,主要从事近净成形及塑性成形技术的研究。E-mail:lulufengye@yahoo.com.cn

等<sup>[8-9]</sup>研究了花键、丝杠等实体表面的高速冷滚打无模无约束增量成形技术,利用金属塑性成形的特点,采用高速旋转的滚打轮滚压和击打毛坯,从而强迫金属流动并形成零件廓形的一种近净成形加工方法。

无模(或柔模)无约束、局部加载的增量成形技术在近十几年来得到国内外学者的广泛关注<sup>[10]</sup>。本文主要综述了局部不均匀加载下板面内弯曲增量成形、单点增量成形、多点柔模成形、高速冷滚打成形的成形原理、工艺、设备及研究现状等方面的研究成果。

### 1 局部不均匀加载下板面内弯曲增量成形

杨合<sup>[2]</sup>通过调整压入量和成形运动方式改变加载条件,实现了无弹性恢复、少起皱和开裂的金属板件小半径面内弯曲成形,适于成形面内弯曲的圆环状零件。研究了不均匀变形协调机理、过程参数的影响规律与成形极限等问题,使 LF21M 等材料的板面内弯曲的成形极限提高了 3 倍以上(图 1)。

局部不均匀加载下板面内弯曲增量成形过程与成形原理见图 2。它是利用连续局部不均匀加载来

实现金属板带的的面内弯曲变形。其成形过程可以利用一对对称布置且相对旋转的锥辊进行楔形轧制来实现,当金属板带从两锥辊间的楔形辊缝中通过时,板带在宽度方向上局部受到不均匀压缩作用时,便产生不均匀的纵向伸长,其结果使金属板在面内产生塑性弯曲变形在纵向产生不均匀伸长,使板带发生面内弯曲,逐步形成圆环<sup>[11]</sup>,其成形装置见图 3。

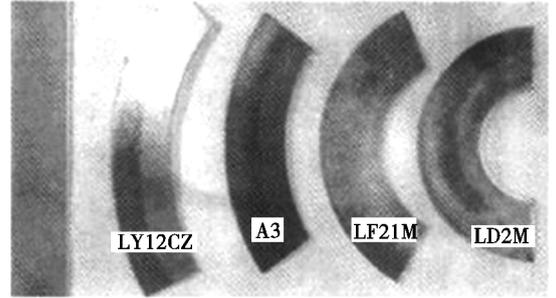


图 1 不同材料面内弯曲件

Fig. 1 In-plane bending of different materials

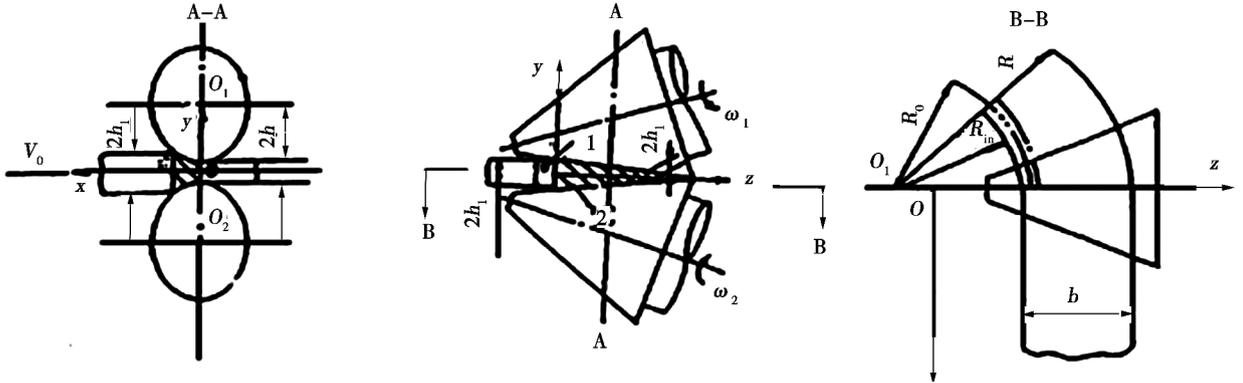


图 2 局部不均匀加载下板面内弯曲成形原理图

Fig. 2 Principle of in-plane bending under unequal local loading incremental forming

1—接触变形区;2—非接触变形区。

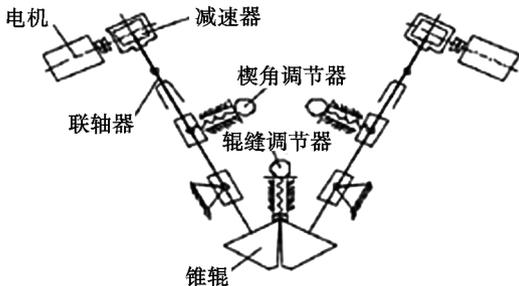
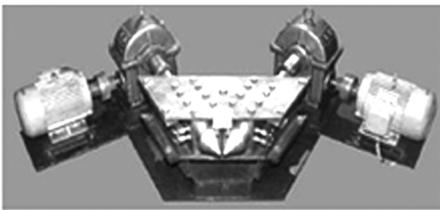


图 3 局部不均匀加载下板面内弯曲增量成形装置

Fig. 3 Experimental apparatus of in-plane bending under unequal local loading incremental forming

考虑到不均匀压缩下金属板带面内弯曲成形过程的复杂性,杨合等采用有限元数值模拟、理论解析与实验研究相结合的研究方法来研究这一成形方法。文献[12]建立了局部不均匀加载下板面内弯曲几何模型,根据非均匀压缩的变形条件及塑性理论揭示了这一成形方法的成形机理是通过不均匀变形协调作用来实现的,且不均匀变形协调作用是渐进累积的过程,并利用不均匀变形协调系数  $C_1, C_2, \dots, C_n$  来描述不均匀变形协调作用,从而进一步提出了含该系数的圆环模型。

$$R = a_z + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \frac{h_i a_i}{h_0 - h_i} \quad (1)$$

式中,  $R$  为形成圆环的外半径,  $a_z$  为接触变形区的宽度,  $n$  为接触变形区宽度上所取的总点数,  $a_i, h_i$  为描述轧件宽度上  $i$  点经受非均匀压缩情况的特征参量,

$c_i$  为不均匀变形协调系数, 反应宽度方向上各点对成形的圆环的贡献。

文献[13]对不均匀压缩下金属板带面内弯曲成形的影响因素进行了分析, 并通过正交试验获得了影响因素的主次顺序, 为建立变形区参数与轧件弯曲半径间的函数关系提供了参考依据。同时获得的弯曲件最外缘处的材料纵向伸长率达 71.8%, 远大于该材料的极限伸长率——30%。试验表明该成形方式可实现小半径薄板面内弯曲, 显著提高了材料的弯曲成形极限。文献[14]对不均匀压缩下金属板带面内弯曲成形开发了相应的模拟系统并用试验验证了其可靠性, 从而为深入系统研究这一过程的变形机理与成形规律提供了一种有效的手段。文献[15]针对金属板带不均匀压下面内弯曲成形技术中迫切需要解决的失稳起皱问题, 提出了物理意义明确、易于求解的统一的描述内、外缘起皱的波形函数, 建立了统一的内、外缘起皱预测准则, 并将该准则引入到刚塑性有限元数值模拟系统 IBS 中。通过试验验证了所建立的起皱预测准则的可靠性, 采用建立的起皱预测准则, 研究了几何参数、材料性能参数及边界条件对成形过程起皱的影响规律。这一研究为板带不均匀压下面内弯曲成形过程成形参数的确定和优化提供了依据。

不均匀塑性变形的板料面内弯曲成形过程是一种先进的塑性加工技术。为了推动这一成形过程的研究、发展和应用, 在丰富不均匀变形理论的基础上, 还需要对不均匀变形协调机理、过程参数的影响规律、成形极限等问题进行深入系统的研究。

## 2 板料单点增量成形

Jeswiet 等所研究的板料单点增量成形工艺无需模具, 只需一套装置, 将坯料固定在装置上, 依靠计算机控制而实现成形。该技术适用于成形比较复杂形状的薄板件<sup>[3]</sup>, 是板料成形领域的研究热点之一。图 4 为板料单点增量成形加工的翼子板。

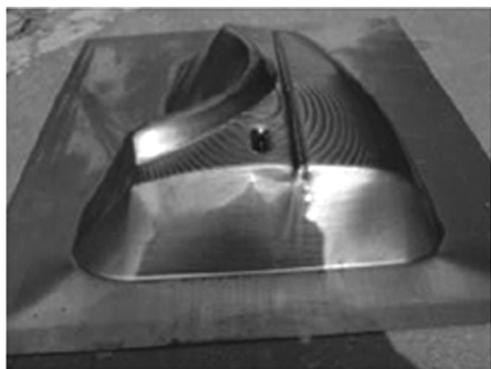


图 4 板料单点增量成形加工的翼子板

Fig. 4 Single point incremental sheet forming for the fender

单点增量成形通常在 CNC 数控机床上进行, 也

被称为逐点增量成形<sup>[7]</sup>。在进行单点增量成形时, 球头柱状成形刀具先走到指定位置, 对板料压下定量的进给量, 使球头柱状成形刀具下的板料产生局部塑性变形; 然后球头柱状成形刀具根据第一层截面轮廓, 并按一定的运动轨迹, 以走等高线的方式对板料进行连续塑性成形, 形成第一层截面轮廓后, 球头柱状成形刀具再进给设定的进给量并按第二层截面轮廓要求对板料进行连续成形, 形成第二层轮廓; 如此逐层成形。该工艺有两个主要特点: 一是板料要按照给定的路径或轨迹进行成形; 二是板料的变形是逐点、逐步发展的, 每一点、每一步的变形量都不大。图 5 为板料的单点增量成形原理图<sup>[4]</sup>, 其系统如图 6 所示。

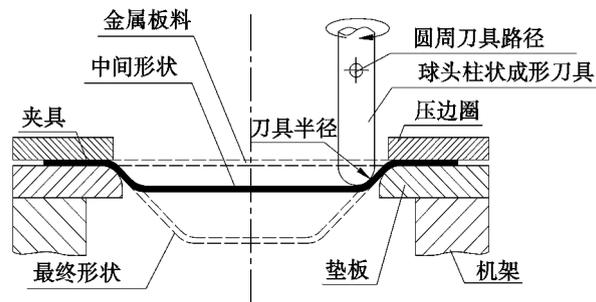


图 5 板料单点增量成形原理图

Fig. 5 Principle of single point incremental sheet forming

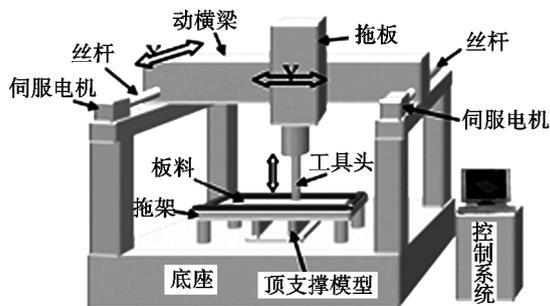


图 6 板料单点增量成形系统

Fig. 6 Single point incremental sheet forming system

文献[16]提出板料单点增量成形具有革新板料成形的潜力, 并预言板料单点增量成形将在制造业的各个领域得以应用, 并对板料增量成形的未来发展趋势做了论述。文献[17]介绍了两种实验设计, 进一步研究了成形参数在板料单点增量成形中的重要性并且指出这些参数在何种程度上影响单点增量成形的成形性能。文献[18]研究了单点增量成形的成形极限, 进行了 Box—Behnken 实验设计并分析了单点增量成形的实验数据, 指出影响单点增量成形的关键因素是: 材料的种类、成形件最大弧度、材料成形形状、球头柱状成形刀具形状和增量步长, 并以图表形式显示了前面列出关键因素的成形极限, 同时绘制了单点增量成形的成形极限图。文献[19]对单点增量成形的高进给率和球头柱状成形刀具高速旋转时的成形效果进行了研究, 并得出了成形件检测标准: 外部非

接触式表面粗糙度(即橘皮效应),厚度分布和截面的微观结构,并从实测粗糙度和所使用的成形参数这两个角度建立了橘皮效应出现位置的预测模型。

哈尔滨工业大学王仲仁<sup>[5]</sup>,主要研究薄壁件数控单点增量成形工艺,其实质是以连续的微小区域变形代替工件整体的成形,由于工件与工具的接触面积小,所以载荷并不大。文献[20]阐述了对数控增量成形技术进行的实验研究,并探讨了加工轨迹对增量成形壁厚分布的影响。同时指出该技术不需专用模具,可通过数控设备加工出成形极限较大、形状复杂的板材零件,应用面较广,适合于航天、汽车和民用产品中的小批量钣金件加工,有着广阔的发展前景;文献[21]以圆弧成形轨迹为例,对较为简单的二维轴对称成形进行分析,从板坯与成形件之间的映射关系入手,讨论了如何控制金属流动,才能使变形后应变均匀化程度得以提高,为成形轨迹的选定提供了理论依据。此外,还指出了增量成形能提高成形极限的原因,探讨了影响成形件表面质量的因素;文献[22]根据对增量成形工艺的研究,提出了增量成形轨迹设计的一般原则,其中变形的均匀化原则对指导板料成形工艺的设计,具有较强的实用价值,并指出不同的成形轨迹对板料变形的影响不同,合理地制定成形轨迹是增量成形工艺的关键。

板料单点增量成形已经应用于包括汽车覆盖件、工艺品、军工制品等零件的生产加工。实践证明,这种成形方法具有经济快速、柔性大等特点,随着对其成形机理的更深入研究和工艺方案的不断完善,制件的成形质量和精度将得到更为有效的控制和改进。

### 3 板料多点柔模成形

板料多点柔模成形是由李明哲命名的金属板材三维曲面成形方法。它是将传统的整体模具离散化,变成形状可变的“柔性模具”,可用于任意形状的板材成形。这样将省去大量的模具制造费用,又能解决单

件、小批量零件的生产问题。其核心原理是将传统的整体模具离散成一系列规则排列、高度可调的冲头,其成形原理如图7所示<sup>[23]</sup>。在整体模具成形中,板材由模具曲面来成形,而多点成形中则由冲头的包络面(或称成形曲面)来完成。各冲头的行程可独立地调节,改变各冲头的位置就改变了成形曲面,也就相当于重新构造了成形模具<sup>[24]</sup>。

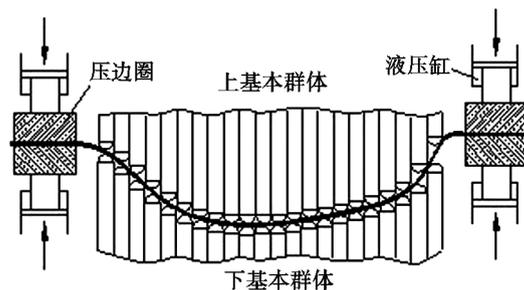


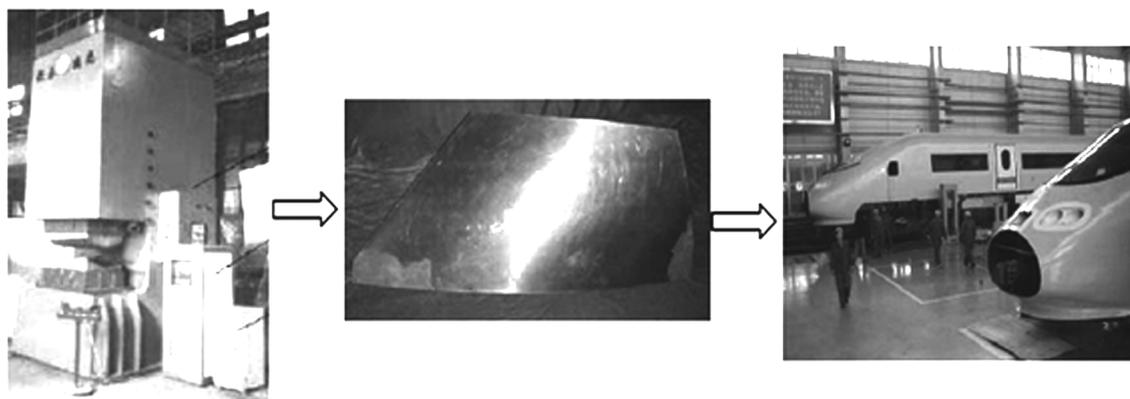
图7 板料多点柔模成形原理图

Fig. 7 Principle of multi-point flexible die forming

板料多点柔模成形技术适用于单件、小批量三维曲面形状零件的加工。采用板料多点柔模成形技术可以节省模具的设计、制造及修模调试等费用。板料多点柔模成形技术加工的零件尺寸越大、批量越小,其优越性越突出,在飞机蒙皮拉形件[图8(a)]、高速列车外蒙皮[图8(b)]等生产批量较小的大型三维曲面零件加工中尤为适用。



(a) 飞机蒙皮拉形件



(b) 高速列车外蒙皮

图8 板料多点柔模成形技术应用

Fig. 8 Application of multi-point flexible die forming

压痕、皱纹、直边效应等是多点成形的典型成形缺陷,李明哲等人通过研究,提出了抑制缺陷的方法。文献[25]以马鞍面成形过程为例,针对多点成形过程中起皱现象的产生原因及其抑制方法进行了数值模拟研究,并进行了实验验证。文献[26—27]就多点成形不同工艺对压痕、起皱、回弹以及制品成形精度的影响进行了数值模拟研究,并且进行了实验验证。其研究表明,多点柔模成形能够有效地抑制压痕和皱纹的产生,并得到变形均匀的制品;反复成形法可有效地减小回弹,提高成形精度;边部优先成形法能够有效地抑制制品的直边效应。文献[28—29]对使用弹性介质和无弹性介质的多点成形过程进行数值模拟,并对成形过程中产生的压痕和起皱现象的影响因素进行了研究。其研究表明,使用弹性介质可以显著地抑制压痕和起皱的发生。

板料多点柔模成形技术还需要深入的研究,如冲头的实时控制、装置结构的优化及实用化和成形过程中回弹的控制。

#### 4 高速冷滚打成形

高速冷滚打成形是依靠材料的塑性,在被成形件与成形工具(滚打轮)之间具有相对运动的同时,通过断续往复运动的成形工具对不断旋转的制件表面高速击打,迫使制件表面局部金属流动产生塑性变形,从而在连续运动中不断击打产生累积效应,最终形成预定形状要求的一种局部加载、无模无约束自由塑性成形技术。

高速冷滚打成形与单点增量成形和板料多点柔模成形相比有明显不同。首先,单点增量成形只针对薄壁件成形,而高速冷滚打的研究对象是实体表面,金属流动的不确定性很大;其次,板料多点柔模成形方法一般可以理解为局部静态加载问题,而高速冷滚打成形是采用断续往复高速击打的方法实现局部动态冲击加载,金属变形机理更加复杂。高速冷滚打成形方法具有设备吨位小、节能、成形过程柔性好等特点。随着这种技术的广泛应用,国内一些学者已经开始进行研究。

汽车花键、机床滚珠丝杠等零件的加工,目前仍以切削为主,材料利用率低、能耗大,尤其是加工过程中切断了金属纤维流线,造成制件强度、疲劳寿命及耐冲击性能下降,而高速冷滚打成形可以避免上述弊端。

##### 4.1 花键冷滚打成形技术

渐开线花键冷滚打成形过程是一高速瞬态、高冲击大变形的复杂成形过程,其成形原理如图9所示。图9中,一对滚打轮分别安装在关于轴坯对称的中心轴上,该轴线与轴坯轴线有一定夹角。加工时,轴坯绕自身轴线旋转并做轴向进给,两侧滚打轮绕各自中心轴高速旋转(公转),当滚打轮与轴坯接触时,靠摩

擦作用绕自身轴线旋转(自转)的同时挤压轴坯,使之产生塑性形变,形成首对花键齿形;之后,滚打轮继续绕中心轴公转,绕行一周后再次接触轴坯,此时轴坯恰绕轴转动连续分度至下一齿形位置处,随之滚打形成下一对齿形;轴坯的轴向进给则使滚打过程形成各花键齿槽。如此不断运动,直至完成花键加工为止。

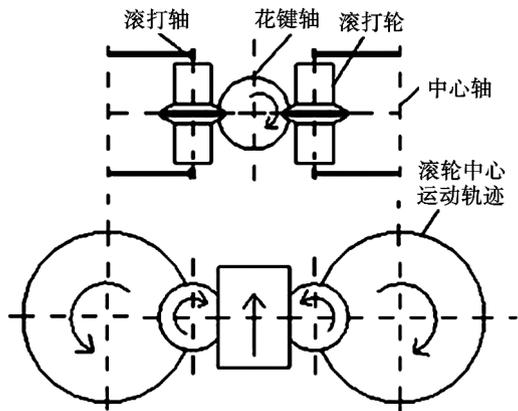


图9 渐开线花键冷滚打成形原理图

Fig.9 Principle of involute spline's cold-rolling

Emst Grob 等首创了齿形的冷滚打技术。Krapfenbauer 介绍了在冷滚打数控机床的带动下,两个高速旋转的滚打轮对毛坯进行击打以形成花键齿的过程,并把这种方法称之为 Grob 滚打法<sup>[30]</sup>。Emst Grob 等人<sup>[31]</sup>对滚打轮的结构设计及滚打轮设计中应注意的问题进行了论述;针对滚打轮的安装倾角问题,采用在滚打轮与滚打轴的连接处增加一个止推环形成一个倾斜平面,使滚打轮按预先合适的安装倾角直接固定在滚打轴上。因不需要调节装置,所以安装误差减小,加工精度提高。Krapfenbauer 等人<sup>[30]</sup>就自动生产线中利用冷滚打方法大批量生产矩形花键进行了研究,对加工零件的精度进行了分析;并利用冷滚打方法加工内花键进行了研究,指出冷滚打内花键的滚打轮与冷滚打外花键的滚打轮的区别,冷滚打内花键的滚打轮具有凹面轮廓,其轮廓相似于零件的外表面。瑞士 GROB 公司已开发出花键滚打设备,用来加工复杂零件表面,并提高了加工精度。

李言等人<sup>[8-9]</sup>对渐开线花键高速冷滚打成形技术进行了研究。文献[32]从运动学的角度分析冷滚打过程中滚打轮与花键轴的运动关系规律,采用坐标变换的方法,确定了滚打轮上任一点和工件齿廓上相应点的关系,建立花键冷滚打运动的数学模型,为冷滚打运动的仿真奠定了基础;文献[33]根据模型计算得到滚打轮在冷滚打运动中形成的花键齿齿廓上数据点,从点云数据中提取特征样条曲线,将其填充成光滑的曲面,对花键轴齿廓进行了曲面重构;文献[34]利用重构后的曲面切割花键轴毛坯实体,得到冷滚打加工一次之后的情况,并仿真了花键轴的成形运

动结果,加工的渐开线花键轴齿槽轮廓见图 10,其仿真结果如图 11 所示。

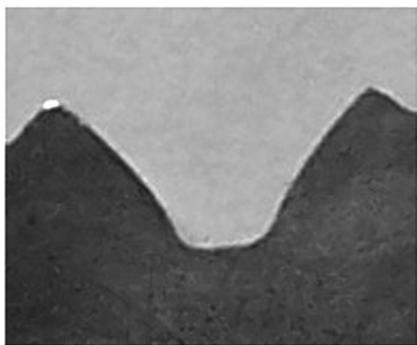


图 10 实验加工的渐开线花键齿槽轮廓

Fig. 10 Transverse tooth profile of experimental involute spline

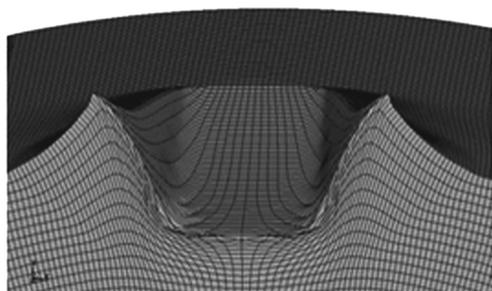


图 11 花键冷滚打成形仿真结果图

Fig. 11 Simulation results of spline's cold-rolling

## 4.2 丝杠冷滚打成形技术

丝杠高速冷滚打成形方法,是采用高速旋转的滚打轮对毛坯进行滚压和打击,迫使制件在运动中不断受到局部击打而产生塑性变形,其累积效应最终实现制件成形的新型绿色成形技术,李言等人对丝杠冷滚打的原理、有限元分析、初步的实验装置进行了研究。

在文献[9]中简述了丝杠冷滚打成形的原理(图 12),根据冷滚打丝杠的工艺特点和多体动力学理论,建立了丝杠冷滚打结构动力学模型,应用 ADAMS 对模型进行了动力学仿真,分析了丝杠在冷滚打过程中的受力情况,并利用试验装置进行了初步试验。仿真和试验结果表明丝杠冷滚打成形工艺可行。

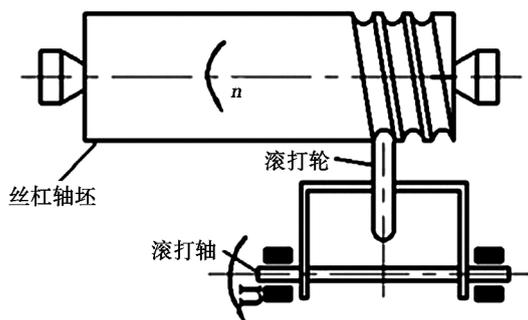


图 12 丝杠冷滚打成形原理

Fig. 12 Principle of lead screw cold roll-beatings shaping

文献[35]利用非线性有限元软件 ABAQUS 建立了丝杠冷滚打的动力学模型并结合实际加工情况进行了丝杠冷滚打成形过程的仿真,研究了成形过程中的受力情况和应力应变变化情况,初步分析了冷滚打过程中金属流动、成形表面形状和表面成形尺寸,并利用自行开发的实验装置进行了初步试验,试验结果与仿真结果一致,验证了有限元仿真的有效性。

文献[36]对丝杠冷滚打技术原理和成形过程进行了分析,研究了丝杠冷滚打的运动关系,根据空间啮合原理,依据滚打轮回转面与被加工螺旋面的接触条件,建立了相应的数学模型,获得了滚打轮的轴向轮廓曲线,并用退火处理的紫铜棒进行了成形试验研究,得到的冷滚打加工的丝杠实物图如图 13 所示;进行了冷滚打工艺试验研究,对丝杠金相组织的变形和硬化层分布进行了分析,试验结果表明:滚道表面硬度明显增大,金属组织得到细化,丝杠性能得到了较好的提升。



图 13 冷滚打加工丝杠实物图

Fig. 13 Experimental trial-piece

高速冷滚打成形具有载荷小、能耗低、柔性高的特点,在花键、丝杠、齿轮等复杂实体表面的成形有着广泛的应用。但高速冷滚打成形的研究还存在以下两方面的问题:(1)缺乏系统的机理研究,使材料的成形没有理论指导;(2)研究的系统性不够,使高速冷滚打成形过程中的参数选择和制件成形精度的控制尚无规律性的依据可循。

## 5 结语

无模(或柔模)无约束、局部加载的增量成形技术虽然起步较晚,但由于该技术把 CAD/CAM、数控和金属塑性成形技术结合起来,不需专用模具,成形极限较大,重复性好,可以控制金属的流动,能加工出形状复杂的零件,该成形技术已经取得了较快的发展。

由于成形的原理和工艺路线与传统精密塑性成形不同,在无模(或柔模)无约束、局部加载的增量成形工艺中坯料的受力由传统精密塑性成形的整体受力变为增量成形的局部受力,因此采用传统理论进行分析时带有很大的局限性;而且,目前无模(或柔模)无约束、局部加载的增量成形工艺的理论研究还处于

发展阶段,因此无模(或柔模)无约束、局部加载的增量成形研究方面的进一步突破还有赖于理论研究的进一步完善。

### 参考文献

- [1] 李敏贤, 闵乃燕, 安桂华, 等. 精密成形技术发展前沿[J]. 中国机械工程, 2000, 11(1/2): 183-186
- [2] 杨合, 孙志超, 詹梅, 等. 局部加载控制不均匀变形与精密塑性成形进展[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(2): 6-14
- [3] Jeswiet J, Ali A. Incremental single point forming [C]. Proceeding of the ASME, International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE), 6-10 November 2000, Manufacturing Engineering Division, MED - Vol. 11, 509-514
- [4] Martins P A F, Bay N, Skjoedt M, et al. Theory of single point incremental forming[J]. Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 247-252
- [5] 王仲仁, 滕步刚, 汤泽军. 塑性加工技术新进展[J]. 中国机械工程, 2009, 20(1): 108-112
- [6] 方漪, 戴昆, 王仲仁. 板材数控增量成形过程的研究[J]. 塑性工程学报, 1999, 6(3): 49-55
- [7] 胡志清, 李明哲. 三维曲面板类件的连续柔性成形技术研究[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(1): 51-54
- [8] 崔凤奎. 高速精密冷滚打成形技术研究[D]. 西安理工大学, 2007
- [9] 李言, 杨明顺, 李玢, 等. 丝杠冷滚打动力学仿真及分析[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(4): 383-387
- [10] 张庆丰, 贾平, 等. 板料增量成形研究进展[J]. 锻压技术, 2010, 35(2): 6-12
- [11] Yang H, Xian F J. Effect of unequal deformation in development of advanced plastic processing technologies[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 15(1): 79-82
- [12] 杨合, 肖红生, 雷军. 板带金属不均匀压下面内弯曲成形机理的研究[J]. 塑性工程学报, 1997, 4(3): 52-58
- [13] 鲜飞军, 杨合, 肖红生. 不均匀压缩下金属板带面内弯曲成形的试验研究[J]. 中国机械工程, 1998, 9(6): 56-59
- [14] 鲜飞军, 杨合. 不均匀压下面内弯曲成形过程的有限元模拟研究[J]. 机械工程学报, 2000, 7(7): 69-73
- [15] 冯桐, 杨合, 孙朝阳, 等. 板带不均匀压下面内弯曲过程失稳起皱的研究[J]. 机械工程学报, 2005, 12(4): 189-194
- [16] Jeswieta J, Micarib F. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal[J]. Manufacturing Technology, 2005, 54(2): 88-114
- [17] Hama M, Jeswieta J. Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003[J]. Manufacturing Technology, 2006, 55(1): 241-244
- [18] Hama M, Jeswieta J. Forming limit curves in single

point incremental forming [J]. Manufacturing Technology, 2007, 56(1): 277-280

[19] Hamiltona K, Jeswiet J. Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds: surface and structural consequences [J]. Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 311-314

[20] 戴昆, 王仲仁, 方漪. 板材零件数控增量成形壁厚变化规律的实验研究[J]. 锻压技术, 1997(6): 28-31

[21] 戴昆, 苑世剑, 王仲仁, 等. 轴对称件多道次数控点成形过程的理论分析[J]. 塑性工程学报, 1998, 5(2): 26-31

[22] 方漪, 戴昆, 王仲仁. 板材数控增量成形过程的研究[J]. 塑性工程学报, 1999, 6(3): 49-55

[23] 李明哲, 崔相吉, 邓玉山, 等. 多点成形技术的现状与发展趋势[J]. 锻压技术与制造技术, 2007(5): 15-18

[24] 李东平, 隋振, 蔡中义, 等. 板材多点成形技术研究综述[J]. 塑性工程学报, 2001, 8(2): 46-48

[25] 李明哲, 李淑慧, 柳泽, 等. 板材多点成形过程起皱现象数值模拟研究[J]. 中国机械工程, 1998, 9(10): 34-38

[26] 李明哲, 李淑慧, 陈建军, 等. 板材多点成形不同工艺方法的数值模拟研究[J]. 中国机械工程, 2000, 11(9): 1042-1046

[27] 李淑慧, 林忠钦, 李明哲. 板条多点成形中曲率分布及回弹控制的研究[J]. 机械工程学报, 2001, 37(11): 92-95

[28] 李雪, 李明哲, 蔡中义. 使用弹性介质的多点成形过程数值模拟研究[J]. 塑性工程学报, 2003, 10(5): 21-24

[29] 蔡中义, 李明哲, 阎雪萍, 等. 板材多点成形过程数值模拟的研究[J]. 塑性工程学报, 2001, 8(4): 47-51

[30] Krapfenbauer H. New aspects for the mass production of spur gears by cold rolling[J]. IPE International Industrial & Production Engineering, 1984, 8(3): 39-41

[31] Ernst Grob, Klapfenbauer H. Roller Head For Cold Rolling of Splined Shafts or Gears [P]. United States, 3818735. 1973

[32] Cui Fengkui, Li Yan, Zhou Yanwei. Analyze and correct model for machining involute spline[J]. Materials Science Forum, 2006, 532: 448-451

[33] 崔凤奎, 李言, 周彦伟, 等. 渐开线花键滚打轮 CAD 及磨削仿真[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 210-215

[34] 全建辉, 崔凤奎, 杨建玺, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的花键冷滚打成形数值模拟[J]. 中国机械工程, 2008, 19(4): 419-422

[35] Li Y, Zhang L. Analysis of lead screw high-speed roll-beating forming[J]. Key Engineering Materials, 2011, 45: 151-155

[36] 李玢. 丝杠高速单点冷滚打系统的分析与设计[D]. 西安: 西安理工大学, 2010

(编辑 吴坚)